http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2012.23.2.213

세포 실험용 다중 주파수 동시 노출 장치 제작

Fabrication of Multiple-Frequency Exposure System for *In Vitro* Experiment

김태홍 · 서민경* · 문지연* · 백정기*

Tae-Hong Kim · Min-Gyeong Seo* · Ji-Yeon Mun* · Jeong-Ki Pack*

요 약

최근 이동 통신 서비스의 증가로 인해 인류는 다양한 전자파에 동시 노출되어 있다. 그러나 전자파의 인체 영향 연구는 주로 단일 주파수에 대해서 행해졌다. 본 논문에서는 다중 주파수의 전자파를 동시에 노출시킬 수 있는 세포 실험 장치를 제작하였다. 세포 실험 장치는 836.5 MHz 주파수의 CDMA(Code Division Multiple Access) 및 1,950 MHz의 WCDMA(Wideband Code Division Multiple Access) 주파수의 신호를 동시에 발생시킬 수 있도록 광대역 특성을 갖는 radial transmission line 형으로 구성하였다. 변조된 신호는 증폭기, 디지털 감쇄기, RF 결합기를 통하여 원추형 안테나로 전달된다. SAR(Specific Absorption Rate)값은 광학 온도 프로브를 이용하여 petri dish 내 9개 지점에 대하여 3회 측정한 평균값을 이용하여 측정하였다. 측정된 안테나의 반사 손실은 −15 dB 이하였고, 단위 입력 전력당 SAR 평균과 표준 편차는 CDMA 주파수에서 0.105±0.019 W/kg, WCDMA 주파수에서 0.262±0.055 W/kg이었다.

Abstract

Recently, we are simultaneously exposed by various electromagnetic sources due to an increase of mobile communication services. However, EMF(Electric, Magnetic and Electromagnetic Field) study has been performed mainly about only single frequency. The objective of this paper is to develop an multiple-frequency exposure system for *in vitro* experiment. The exposure unit for *in vitro* experiments was designed by radial transmission line type to get broadband characteristics to generate signals of CDMA at 836.5 MHz and WCDMA at 1950 MHz frequency simultaneously. The modulated signals were delivered to the conical antenna through amplifier, digital attenuator and RF combiner. SAR values were obtained by the averaged values of 3 measured values at 9 points in petri dish using the fiber optic temperature probe. The measured return loss was under −15 dB. For 1 W input power, the mean value and standard deviation of SAR were 0.105±0.019 for the CDMA frequency and 0.262±0.055 for the WCDMA frequency.

Key words : RTL, Conical Antenna, *In Vitro*, SAR

Ⅰ. 서 론

전자파 인체 노출의 유해성에 대해서는 현재까지도 많은 논란이 지속되고 있다. 국내에서는 2000년 말에 인체 보호 기준을 고시하고, 2002년부터 휴대폰에 대한 노출량을 강제 규제하고 있다. 이러한 논란은 2011년 5월 WHO(World Health Organization) 산하 국제암연구소에서 휴대전화의 전자파가 암을 유

충남대학교 전자파환경기술연구센터(ElectroMagnetic Environment Research Center in Chungnam National University)
*충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science and Engineering, Chungnam National University)
· 논 문 번 호 : 20111128-150
· 교 신 저 자 : 백정기(e-mail : jkpack@cnu.ac.kr)
· 심사일자 : 2012년 1월 11일 · 수정완료일자 : 2012년 1월 26일

발시킬 수 있다는 발표로 인해 더욱 뜨거워지고 있다. 전자파의 인체 노출에 대한 연구는 크게 역학(epidemiology) 연구, 동물 실험(*in vivo*) 연구, 세포 실험(*in vitro*) 연구 등으로 크게 나눌 수 있다[1],[2]. 이러한 세포 실험을 위해서는 전자파 노출 장치가 필요한데, 세포 노출 장치는 일반적으로 노출 대상 내의 SAR 분포를 정확히 예측할 수 있어야 하며, 신호원은 실제 시스템의 파형을 발생시킬 수 있어야 한다는 요구 조건을 만족시켜야 한다. 또한, 외부 전자기장의 영향을 받지 않고, 다른 실험 장치 및 실험자에게 영향을 미치지 않도록 적절히 차폐되어야 한다. 세포 실험용 노출 장치의 경우는 일반적인 세포 배양 실험에서와 같은 환경 조건(온도, 습도 및 CO_2 농도)을 만들어 주어야 하며, 특히 SAR 값이 큰 경우에는 냉각수를 사용하여 냉각을 시켜줄 수 있어야 한다. 이는 실제 생체 내의 조직에서는 국부 SAR이 높은 경우에도 혈액 등을 통한 열 조절 메커니즘에 의해 온도 상승이 크지 않은 반면, 세포 실험의 경우에는 배양액의 온도가 크게 상승할 수 있기 때문이다. 단일 주파수의 전자파 노출에 대한 연구는 많이 수행됐으나, 다중 주파수의 노출에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았다[3]. 따라서 본 연구의 목적은 세포 실험을 위한 다중 주파수의 동시 노출이 가능한 전자파 노출 장치를 제작하는 것이다.

Ⅱ. 세포노출장치 설계

2-1 세포 노출장치의 종류

세포 노출 장치는 노출의 형태에 따라 공진형(resonant type), 방사형(radiation type), 전파형(propagation type)의 세 가지로 구분할 수 있다. 공진형 노출 시스템은 short-circuited rectangular waveguide의 구조로 높은 효율과 전기장과 자기장의 최대값이 분리되는 장점이 있는 반면, 시험 샘플의 위치에 민감하며 필드 균일도가 좋지 않고, 단일 주파수에서만 동작한다는 단점이 있다[4]. 방사형은 horn 안테나와 유전체 렌즈를 사용하여 제작되며, 크기가 매우 크기 때문에 세포 실험용보다는 동물 실험용으로 많이 사용되고, 효율성이 낮으며, 실험 샘플에 대한 균일도도 낮은 편이다[5]. 그리고 전파형은 TEM/GTEM 셀, 도파관, RTL(Radial Transmission Line) 구조 등 용도에 맞게 다양한 형태로의 제작이 가능한 장점이 있지만, 샘플 도즈(dose)의 크기와 위치, 샘플량에 따라 SAR 값이나 균일도가 민감하기 때문에 세심한 설계가 요구된다[6],[7].

본 논문에서 설계하고자 하는 노출 시스템의 사양은 다음과 같다.

- 온도 조절: 37±0.2 ℃
- 신호 발생원: CDMA, WCDMA source(표준 신호로 변조되며, 출력 및 노출 시간 조절 가능)
- 동시 실험할 수 있는 petri dish 수
  - 직경 100 mm인 경우 6개 이상
  - 직경 60 mm인 경우 10개 이상
- 냉각 및 이산화탄소 가스 제어: 센서

본 논문에서는 위의 일반 조건을 모두 만족시키는 구조로 전파형의 RTL구조를 이용하여 노출 장치를 설계하였다.

2-2 원추형 안테나 설계

RTL 내에 다중 주파수의 동시 급전을 위해 광대역 안테나가 필요하다. 또한, 여러 샘플을 동시에 실험하기 위해 무지향성이 요구된다. 이러한 다양한 요구조건을 충족시키기 위해서는 원추형 안테나가 적합하다. 무한한 길이의 원추형 안테나는 주파수에 무관한 안테나로서 입력 임피던스는 다음 식 (1)과 같다[8],[9].

$$Z_0 = 60 \ln(\cot(\theta/2)) \tag{1}$$

(단, θ는 원추의 각도)

그림 1은 각도에 따른 입력 임피던스 값의 변화를 도시한 것이다. 원추의 각도가 47°에서 50 ohm의 입력 임피던스가 되는 것을 알 수 있다.

그러나 실제 원추의 길이는 유한하기 때문에 유한한 원추의 입력 임피던스는 식 (2)와 같이 변형된다.

$$Z_0(f) = Z_0 \frac{1-\beta/\alpha}{1+\beta/\alpha} \tag{2}$$

여기서,

$$\frac{\beta}{\alpha} = e^{-jka} \frac{1 + j\frac{60}{Z_0} \sum_{n=1,3,5,\ldots}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [P_n(\cos\theta)]^2 \zeta_n(ka)}{-1 + j\frac{60}{Z_0} \sum_{n=1,3,5,\ldots}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [P_n(\cos\theta)]^2 \zeta_n(ka)},$$

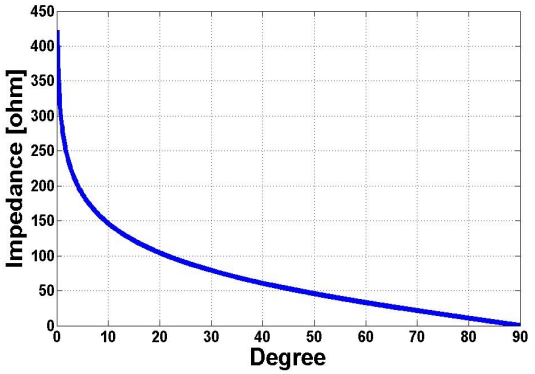

그림 1. 원추 각도에 따른 입력 임피던스 변화
Fig. 1. Variation of input impedance according to cone angle.

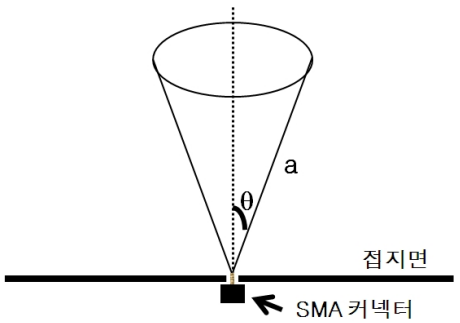

그림 2. 접지면 위의 유한한 원추형 안테나
Fig. 2. Finite conical antenna on the ground plane.

$$\zeta_n(ka) = \frac{h_n^{(2)}(ka)}{h_{n-1}^{(2)}(ka) - \frac{n}{ka} h_n^{(2)}(ka)},$$

$P_n(\cos\theta)$은 n차의 Legendre 다항식, $h_n^{(2)}$는 제 2종 구형 Hankel 함수이다. 그림 2는 접지면 위에 유한한 원추형 안테나를 보인 것이다.

그림 3은 50 ohm 정합을 위해 각도를 47°로 설정하고, 원추의 높이를 43.5 mm 정한 후에 계산한 입력 임피던스 값이다. 주파수가 올라감에 따라 무한한 원추형 안테나의 임피던스처럼 저항은 50 ohm, 리액턴스는 0으로 수렴하는 것을 알 수 있다.

2-3 RTL 챔버의 설계

그림 4는 앞 절에서 설계된 원추형 안테나를 이용하여 설계된 RTL 챔버를 보인 것이다. 챔버의 규격은 그림에서 확인할 수 있는 것과 같고, 그림에 표기

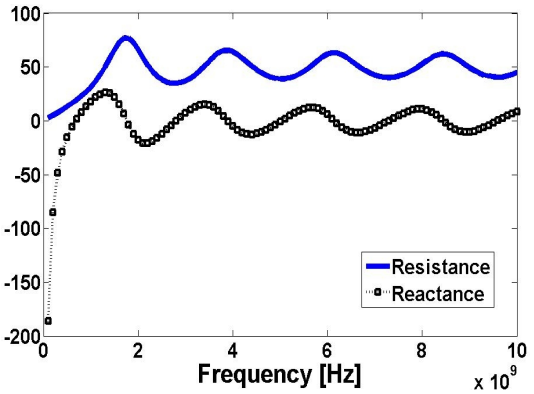

그림 3. 유한한 원추형 안테나의 주파수에 따른 입력 임피던스
Fig. 3. Input impedance of finite conical antenna as a function of the frequency.

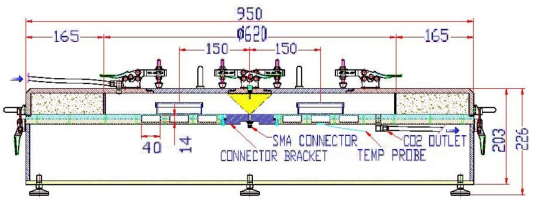

그림 4. 설계된 광대역 RTL 챔버
Fig. 4. Designed broadband RTL chamber.

된 수치의 단위는 mm이다. 두 개의 원형 금속판의 중심에 원추형 안테나를 이용하여 급전을 하고, 최외각에는 전자파 흡수체를 넣어서 반사를 최소화 시켰다. 기존의 RTL 구조의 노출 장치[7]는 2.4 GHz의 협대역 장치이며, SAR 값의 효율이 다소 낮지만, 본 논문의 노출 장치는 광대역(800 MHz~5 GHz)에서 동작하도록 설계되었고, 또한 안테나 정합 특성을 개선시켜서 입력 전력 대비 SAR값의 효율을 높였다.

RTL의 기본 동작은 TEM 모드로 동작하며, 전기장의 세기는 radial 방향으로 전파거리의 제곱근에 반비례한다[10]. 세포 실험을 위해서는 온도 유지가 중요하므로 RTL 챔버 아래에 냉각수를 흐르게 하여 온도 조절을 하였다. 또한, 세포 실험을 위한 CO_2 농도와 습도를 적절히 유지시키기 위하여 인큐베이터로부터 가스를 RTL 챔버에 순환시킴으로써 자동으로 조절 가능하게 하였다. 신호 발생원은 표준 신호(reference signal)로 변조된 제 2세대 이동 통신의 셀

룰라 주파수인 836.5 MHz의 CDMA 신호와 제 3세대 이동 통신인 1.95 GHz의 WCDMA 신호를 사용하였다. CDMA와 WCDMA 신호로 각각 변조된 신호는 디지털 감쇄기를 거쳐 최대 출력이 60 W까지 가능한 증폭기와 RF 결합기를 거쳐 conical 안테나에 의해 노출 장치 내부에 공급된다. 신호원의 출력 레벨은 컴퓨터에 의해 노출 시간 및 노출량을 제어할 수 있도록 구성되어 있다.

Ⅲ. 세포노출장치 측정

그림 5는 제작된 RTL 챔버의 내부를 보인 것이다. 챔버 중심부에 급전을 위한 원추형 안테나가 있다.

그림 6은 RTL 챔버 내의 원추형 안테나의 반사 손실의 측정치로서 CDMA, WCDMA 각각의 주파수에서 −15.23 dB, −18.16 dB로서 −15 dB 이하의 우수한 정합 특성을 확인할 수 있다.

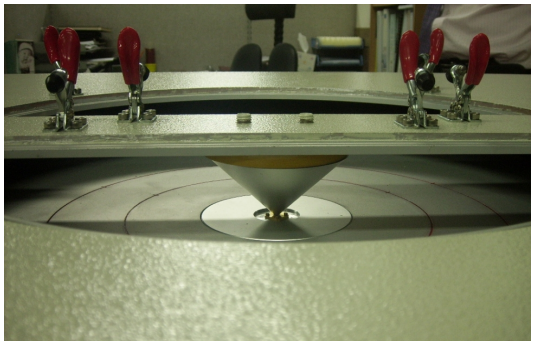

그림 5. 제작된 RTL 챔버
Fig. 5. Fabricated RTL chamber.

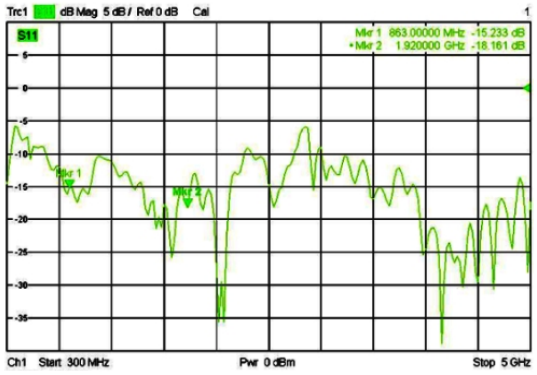

그림 6. RTL 챔버 내의 반사 손실 측정값
Fig. 6. Measured return loss in the RTL chanmber.

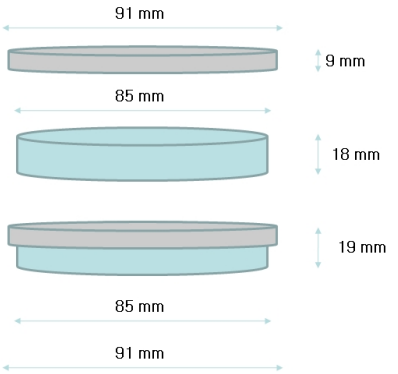

그림 7. 세포 실험용 petri dish의 모양
Fig. 7. Shape of the petri dish for *in vitro* experiment.

RTL 챔버에서의 SAR 값은 샘플의 위치, 모양, 배양액의 양 등에 영향을 받는다. 그림 7은 일반적으로 100 mm petri dish로 불리는 세포 실험용으로 사용될 petri dish를 보인 것이다. 위에서부터 dish의 뚜껑, dish, 뚜껑을 덮은 petri dish의 순서로 높이 및 직경을 나타내었다.

SAR은 식 (3)과 같이 비열과 시간에 따른 온도의 변화율의 곱으로 정의된다.

$$SAR = C_p \frac{dT}{dt}|_{t=0} \text{ [W/kg]} \quad (3)$$

(단, C_p는 배양액의 비열)

이 식은 배양액의 열 확산, 열 방사 등으로 인한 열적 손실을 0이라고 가정할 때 특정한 한 지점에서의 SAR을 나타낸다. 실험에 사용된 배양액의 양은 온도 프로브를 이용하여 SAR를 측정하기 위하여 3 mm 높이가 되도록 17 ml를 넣었다. 그림 8은 petri dish 내 9개의 측정 위치 및 위치별 CDMA, WCDMA 주파수에 대한 SAR 값을 보인 것이다.

그림 9는 WCDMA 주파수 대역에서 petri dish 내의 중심부에서의 온도 변화를 측정한 결과를 보인 것이다. 측정에 사용된 온도 프로브는 Luxtron Fluoroptic Thermometer Model 502(정확도 ±0.1 ℃)로 SAR 계산 시 온도 측정은 열평형 상태에서 냉각수 없이 순수 전자파에 의한 온도 상승률을 측정한다. 너무 오랜 시간 측정 시에는 온도값이 수렴하게 되므로 수렴되기 전에 기울기를 구해야 한다. 본 논문에서는 수렴되기 전 3분 동안(초당 2회 측정) 측정한 360개 데이터를 최소 자승근사법을 이용하여 선형 피팅을 수행

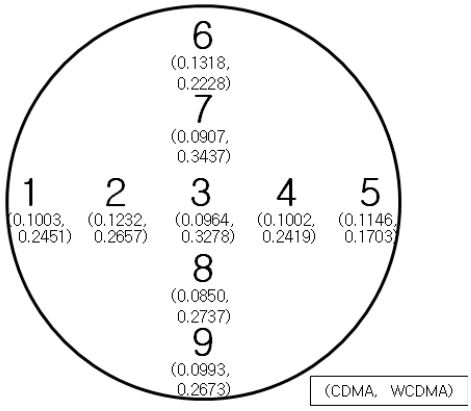

그림 8. Petri dish 내의 측정 위치 및 SAR 값
Fig. 8. Measurement points in petri dish and SAR values for each points.

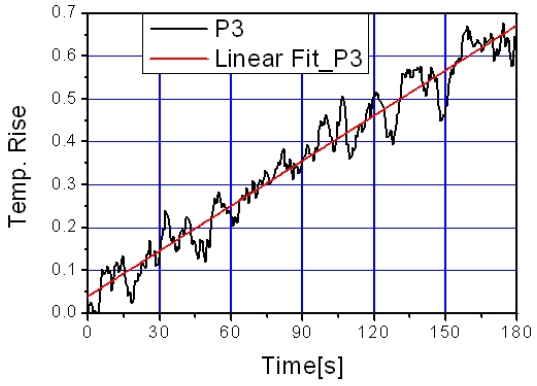

그림 9. Petri dish 중심부에서 시간에 따른 온도 변화
Fig. 9. Temperature variation as a function of time at the center of petri dish.

표 1. 1 W 입력 전력 당 SAR 평균과 표준 편차
Table 1. The mean and standard deviation of SAR for 1 W input power.

구분	CDMA	WCDMA
평균	0.1046	0.2620
표준 편차	0.0188	0.0546

하였다.

표 1은 17 ml의 배양액을 이용하여 1 W 입력 전력당 측정된 SAR 값의 평균과 표준 편차 결과이다. SAR값의 측정오차를 줄이기 위하여 petri dish 내 9개 지점에 대하여 각각 3회를 측정하여 각 포인트별로 평균값을 구한 다음, 이 평균값을 이용하여 petri dish 내의 전체 SAR 평균값과 표준 편차를 구했다. 1 W의 입력 전력에 대한 SAR 값은 CDMA 주파수에서는 0.1046(W/kg)/W, WCDMA는 0.2620(W/kg)/W이다. 이러한 값의 차이는 WCDMA 주파수 대역의 도전율 값이 2.5로서 CDMA 주파수에서의 0.87보다 2.87배 크기 때문이다. 최대 출력이 60 W까지 가능하기 때문에 CDMA, WCDMA 주파수에 대해 각각 6.275 W/kg, 15.720 W/kg의 SAR 값으로 실험이 가능하며, 동시 최대는 21.995 W/kg 의 SAR값의 실험이 가능하다.

Ⅳ. 결 론

이동 통신의 발달로 전파에 대한 수요가 높아지고 있으며, 전파는 통신뿐만 아니라 의료, 교통 및 주변의 일상생활에서 폭넓게 사용되고 있다. 이에 따라 전자파의 인체 영향에 대한 관심도가 높아지고 있다. 본 논문에서는 이러한 전자파에 의한 인체의 영향 연구를 위한 세포 실험용 위한 전자파 노출장치를 개발하였다. 본 논문에서 개발된 장치는 단일 주파수에서만 동작하는 노출장치가 아니라, 다양한 주파수에서 동시 노출이 가능하도록 설계되었다. 제작된 노출장치는 800 MHz 대역의 CDMA 신호와 3세대 이동 통신 주파수인 2 GHz 대역의 WCDMA 신호를 동시에 노출시킬 수 있다.

각각의 변조된 신호는 최대 60 W까지 출력이 가능토록 설계되어 있어서 SAR 값 측정 결과, CDMA, WCDMA 주파수에 대해 최대 6.275 W/kg, 15.720 W/kg의 SAR 값으로 실험이 가능하며, 동시 노출 시에는 최대 21.995 W/kg의 SAR값의 실험이 가능하다. 설계된 구조는 5 GHz 주파수 대역까지 광대역 특성을 가지기 때문에 추후에 RF 소스를 추가하면 다양한 소스원의 노출에 대한 세포 실험이 가능할 것이다. 제작된 노출장치는 현재 세포 실험에 사용되고 있다.

참 고 문 헌

[1] C. K. Chou, H. Bassen, L. Osepchuck, Q. Balzano, R. Petersen, M. Meltz, R. Cleveland, J. C. Lin, and L. Heynick, "Radio frequency electromagnetic exposure tutorial review on experimental dosimetry", *Bio-*

electromagnetics, vol. 17, issue 3, pp. 195-208, 1996.

[2] http://www.who.int/peh-emf/research/agenda/en/index.html

[3] A. W. Guy, C. K. Chou, and J. A. McDougall, "A quarter century of *in vitro* research: A new look at exposure methods", *Bioelectromagnetics*, vol. 20, issue 8, pp. 21-39, Nov. 1999.

[4] Maria Lucia Calabrese, Guglielmo d'Ambrosio, Rita Massa, and Giovanni Petraglia, "A high-efficiency waveguide applicator for *in vitro* exposure of mammalian cells at 1.95 GHz", *IEEE MTT.*, vol. 54, no. 5, pp. 2256-2264, May 2006.

[5] Takahiro Lyama, Hidetoshi Ebara, Yoshiaki Tarusawa, Shinji Uebayashi, Masaru Sekijima, Toshio Nojima, and Junji Miyakoshi, "Large scale *in vitro* experiment system for 2 GHz exposure", *Bioelectromagnetics*, vol. 25, pp. 599-606, Oct. 2004.

[6] Milica Popovi'c, Susan C. Hagness, and Allen Taflove, "Finite-difference time domain analysis of a complete transverse electromagnetic cell loaded with liquid biological media in culture dishes", *IEEE Trans. Biome.*, vol. 45, no. 8, pp. 1067-1076, Aug. 1998.

[7] Eduardo G. Moros, William L. Straube, and William F. Pickard, "The radial transmission line as a broadband shielded exposure system for microwave irradiation of large numbers of culture flasks", *Bioelectromagnetics*, vol. 20, issue 2, pp. 65-80, 1999.

[8] C. H. Papas, R. King, "Input impedance of wide-angle conical antennas fed by a coaxial line", *Proceeding of IRE*, vol. 37, issue 11, pp. 1269-1271, Nov. 1949.

[9] G. M. James, S. S. Glenn, "Optimization of a conical antenna for pulse radiation: An efficient design using resistive loading", *IEEE Trans.*, *AP*, vol. 41, no. 7, pp. 940-947, Jul. 1993.

[10] V. Hansen, A. Bitz, J. Streckert, and A. Lerchl, "RF-exposure system for the uniform exposure of a large number of biological samples", *Inter. Symp.*, *EMC*, Japan, pp. 349-352, 1999.

김 태 홍

1997년 2월: 전남대학교 전자공학과 (공학사)
1999년 2월: 전남대학교 전자공학과 (공학석사)
2005년 2월: 전남대학교 전자정보통신공학과 (공학박사)
2002년 5월～2006년 2월: 전남대학교 고품질전기전자부품 및 시스템 연구센터 전문연구요원
2006년 3월～현재: 충남대학교 전자파환경기술연구센터 연구교수
[주 관심분야] 전자파 수치 해석, 수동 소자 설계

서 민 경

2011년 2월: 충남대학교 전기정보통신공학부 전자전파정보통신 (공학사)
2011년 3월～현재: 충남대학교 전파공학과 석사과정
[주 관심분야] 전자파 인체영향, 전자파 전파

문 지 연

2011년 2월: 충남대학교 전기정보통신공학부 전자전파정보통신 (공학사)
2011년 3월～현재 : 충남대학교 전파공학과 석사과정
[주 관심분야] 전자파 인체영향, 전자파 전파

백 정 기

1978년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1985년 9월: Virginia Tech. 전자파 전파 (공학석사)
1988년 9월: Virginia Tech. 전자파 전파 (공학박사)
1978년 3월～1983년 2월: 국방과학연구소
1988년 10월～1989년 2월: 한국전자통신연구원
1989년 3월～1995년 2월: 동아대학교 전자공학과 부교수
2009년 1월～2009년 12월: 한국전자파학회 학회장
1995년 2월～현재: 충남대학교 전파공학과 교수
2002년 3월～현재: 충남대학교 전자파환경기술연구(EM-ERC) 센터장
[주 관심분야] 전자파 전파, 전자파 산란, 전자파 인체영향